

고성능 컴퓨팅을 이용한 곡면형 작동기의 최적 설계

정순완* · 김승조**

Optimal Design of Curved Actuator through High Performance Computing

Soon Wan Chung and Seung Jo Kim

Key Words : Curved actuator, Optimal design, THUNDER, High Performance Computing

ABSTRACT

In this paper, the electromechanical displacements of curved actuators such as THUNDER are calculated by finite element method to design the optimal configuration of curved actuators. To predict the pre-stress in the device due to the mismatch in coefficients of thermal expansion, the adhesive as well as metal and PZT ceramic is also numerically modeled by using hexahedral solid elements. Because the modeling of these thin layers causes the numbers of degree of freedom to increase, large-scale structural analyses are performed in a cluster system in this study. The curved shape and pre-stress in the actuator are obtained by the cured curvature analysis. The displacement under the piezoelectric force by an applied voltage is also calculated to compare the performance of curved actuator. The thickness of metal and adhesive, the number of metal layer are chosen as design factors.

1. 서 론

최근 들어 작동력을 크게 하기 위해 THUNDER(THin layer UNimorph DrivER)[1,2]나 RAINBOW(Reduced And Internally Biased Oxide Wafer)[3,4]와 같이 곡면형 작동기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 곡면형 작동기의 대부분은 하나의 압전 세라믹에 얇은 금속판을 붙인 unimorph 형태인데, THUNDER와 RAINBOW가 대표적이다. THUNDER는 압전 PZT 세라믹에 고온 폴리이미드 접착제인 LaRC™-SI[5,6]를 사용하여 금속판을 붙여서 만드는데, 고온에서 냉각시켜 열팽창계수의 차를 이용하여 곡면형태를 만든다. RAINBOW는 고온에서 압전 세라믹의 한쪽 면을 화학처리하고 열팽창계수 차를 이용하여 돔 형태를 만든다. 그리고 최근에는 금속 대신 복합재료

를 사용한 LIPCA[7]도 개발되었다. 이러한 곡면형 작동기들은 일반 평면형 작동기에 비해 적은 비용, 설계 적응성, 높은 효율 등의 장점이 있다. 이제까지 진행된 곡면형 작동기에 관한 연구들은 주로 실험적인 연구[8~10]가 주를 이루었고 접착제를 고려하지 않는 유한요소 해석[11] 등이 수행되었다. 본 연구에서는, 계산 성능의 향상으로 보다 정밀한 계산이 가능해지고 있으므로, 접착제를 포함한 얇은 층을 각각 8 절점 고체 요소로 모델링하여 1 백만 자유도 이상의 수치모델을 해석하였다. 해석에 사용된 고성능 컴퓨팅 자원은 본 연구실에서 구축한 PEGASUS 시스템에서 얻었다.

수치예제로는, 우선, 곡면형 작동기의 형태와 내부 응력을 구하기 위해 성형 곡률 해석이 수행되었다. 그리고 입력 볼트에 대한 작동 변위를 구하기 위한 작동성능 해석이 이루어졌다. 설계 변수로는 각 층(금속, 접착제)의 두께와 금속 층의 개수를 선택하였다. 이들 각각에 대해서 선형 해석은 물론, 비선형 해석을 위한 병렬 프로그램도

* 서울대 기계항공공학부, 박사후 연구원

** 서울대 기계항공공학부, 교수

개발하여 보다 정교한 해석 결과를 구하고 온도 변화에 따른 물성치 변화를 고려할 수 있었다.

2. 유한요소 정식화

2.1 선형 해석

일반적인 선형 정적 해석의 유한요소 정식화는 가상일의 원리를 사용하여 식(1)로 정리되고, 선형 탄성 구성법칙은 식(2)와 같다.

$$\left(\int \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dV\right) \mathbf{U} = \int \mathbf{N}^T \mathbf{p} dS + \int \mathbf{N}^T \mathbf{f} dV \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\epsilon} \quad (2)$$

여기서, \mathbf{B} 는 변형도-변위 행렬, \mathbf{C} 는 응력-변형도 행렬, \mathbf{U} 는 변위, \mathbf{N} 은 보간 행렬, \mathbf{p} 는 표면력, \mathbf{f} 는 체적력, $\boldsymbol{\sigma}$ 와 $\boldsymbol{\epsilon}$ 은 각각 응력과 변형도를 나타낸다. 식(2)를 압전 효과를 고려하여 다시 쓰면 식(3)과 같고, 여기서 \mathbf{d} 는 압전 전하상수, \mathbf{E} 는 전기장, \mathbf{V} 는 입력 볼트이다.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}(\boldsymbol{\epsilon} - \mathbf{d}\mathbf{E}) = \mathbf{C}\left(\boldsymbol{\epsilon} - \mathbf{d}\frac{\mathbf{V}}{t}\right) \quad (3)$$

식(3)에 열 변형도를 포함하면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\left(\boldsymbol{\epsilon} - \mathbf{d}\frac{\mathbf{V}}{t} - \boldsymbol{\epsilon}_h\right) \quad (4)$$

따라서, 체적력과 표면력을 무시하면, 선형 압전 열해석을 위한 유한요소 정식화는 다음으로 정리된다.

$$\left(\int \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dV\right) \mathbf{U} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{d} \frac{\mathbf{V}}{t} dV + \int \mathbf{B}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\epsilon}_h dV \quad (5)$$

본 연구에서는 입력 볼트는 두께 방향으로 일정하고 \mathbf{C}, \mathbf{d} 와 같은 재료상수도 성형 과정 중에 일정하다고 가정한다.

2.2 비선형 해석

성형 과정과 작동 성능 측정 과정을 정확히 모사하고 온도 변화에 따른 재료상수의 변화를 고려하기 위해 비선형 해석 프로그램을 개발하였다. 초기 형상을 기준으로 기술하는 total Lagrangian 정식화를 사용하였고 1차 Piola-Kirchhoff 응력을 극분해를 통해 식(6)과 같이 표현할 수 있다. 식(6)을 평형방정식(식(7))에 대입하고 test function \mathbf{q} 를 사용하여 약형으로 표현하면 식(8)과 같다.

$$\mathbf{T} = \mathbf{J} \mathbf{R} \mathbf{S} \mathbf{U}^{-1} \quad (6)$$

$$\nabla_{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{T} = 0 \quad (7)$$

$$\int \mathbf{J} \mathbf{R} \mathbf{S} \mathbf{U}^{-1} : \nabla \mathbf{q} dX = \left[\int \mathbf{R} \mathbf{A} \mathbf{S} \mathbf{U}^{-1} \right]_n^{i-1} : \nabla \mathbf{q} dX - \left[\mathbf{A} \mathbf{R} \mathbf{S} \mathbf{U}^{-1} \right]_n^{i-1} : \nabla \mathbf{q} dX - \left[\mathbf{R} \mathbf{S} \mathbf{A} \mathbf{U}^{-1} \right]_n^{i-1} : \nabla \mathbf{q} dX - \int \mathbf{T}_n^{i-1} : \nabla \mathbf{q} dX \quad (8)$$

여기서, $\Delta \mathbf{S} = \mathbf{C}_n (\Delta \boldsymbol{\epsilon}_h + \mathbf{d} \frac{\Delta \mathbf{V}}{t})$ 이다.

3. 계산환경

본 연구에서는 얇은 층 각각을 고체 요소로 모델링했으므로 수치 모델의 자유도는 매우 커진다. 이의 유한요소 해석을 위해 고성능 계산자원으로 본 연구실에서 구축한 PEGASUS 시스템을 사용하였다. 이 시스템은 180개의 노드(각 노드당 2개의 인텔 제온 CPU 장착)로 구성되어 있고, 각 노드는 3기가 메모리와 80기가 하드 디스크가 설치되어 있다. 네트워크 장비는 Gigabit switch hub와 GBIC(Gigabit interface converter)으로 이루어져 있다. 이 시스템은 지난 2002년 11월에 발표된 슈퍼컴퓨팅 순위에서 80위(국내 1위)를 차지하였다. 수치 예제에서 16노드(32 CPU)씩 묶어서 계산하였는데 약 1백만 자유도 문제를 푸는데 약 1시간이 소요되었다.

4. 수치해석

본 수치예제에서는 접착제 LaRC™-SI의 전이 온도(transition temperature)인 250°C에서 각 층이 결합된다고 가정하였고 성형과정 중의 압력 효과는 고려하지 않았다. 경계조건은 한 쪽은 단순 지지이고, 다른 쪽은 면내에서 자유롭게 움직이도록 하였다. 성형 해석시의 하중조건은 250°C에서 상온으로 감소하는 온도하중 조건을 사용하였다.

4.1 실험치와의 비교

사용한 모델은 왼쪽 그림과 같이 PZT 5A 세라믹 위에 알루미늄을 놓고, 아래에 스테인리스 스틸을 놓은 THUNDER 모델이다. 크기는 가로, 세로 각각 25.4mm이다. 접착제의 Young's modulus는 4GPa이고, 열팽창계수는 $46 \times 10^{-6} / C$ 이다. 사용한 자유

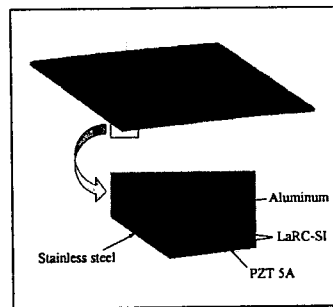


Fig.1 Finite element mesh for verification model

도 개수에 따라 4개의 모델에 대해 해석했는데 사용된 요소 하나의 크기와 자유도 개수는 표 1과 같다. 실험치와 함께 평판 요소와 강체 보요소로 모델링한 NASTRAN 해석 결과[12]를 비교하였다. 그림 2는 뒀 높이에 대해서 실험치와 NASTRAN 결과, 그리고 본 연구의 선형, 비선형 해석 결과를

비교하였다. 비선형 해석에서는 온도 변화에 따른 접착제의 Young's modulus 의 변화를 고려하였다.[6] 본 연구의 결과가 NASTRAN 결과보다 우수한 결과를 나타내고 있으며, 요소의 크기가 작을수록, 즉 사용한 자유도의 개수가 많을수록 실험치에 가까워지는 것을 볼 수 있다.

작동 변위를 비교하기 위해 입력볼트 240Vpp 를 가했을 때의 중앙점에서의 변위를 비교하였는데, 비선형 해석 결과의 경우, NASTRAN 결과보다 실험치에 더 가까운 결과를 얻을 수 있었다. 선형 해석의 경우, 성형 과정 이후에 전압을 가해야 하므로 2 단계로 계산할 수 있도록 프로그램 수정 작업을 진행 중이다.

Table 1. Element size and DOF of verification model

Model name	V1	V2	V3	V4
Element size (mm×mm)	0.508×0.508	0.254×0.254	0.169×0.169	0.127×0.127
DOF	132,651	520,251	1,162,851	2,060,451

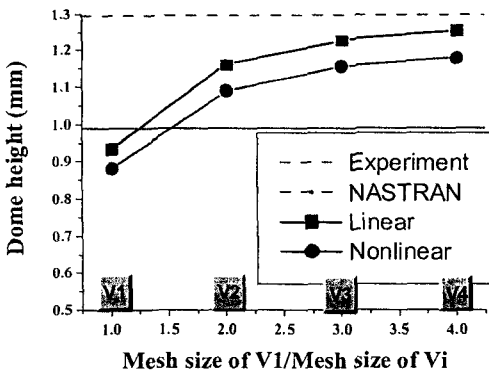


Fig.2 Curing dome height

4.2 최적 설계(선형해석)

THUNDER 7R(가로 97.5mm, 세로 24mm)을 기본 모델로 하고, 압전 세라믹을 PZT C-82 로 사용했을 때 설계변수의 변화에 따라 돔 높이와 작동 변위를 비교하였다. 표 2 는 기본 모델(CA-std)의 물성치와 두께를 나타내고 있는데 설계 변수에 따라 다음과 같은 모델명을 사용하였다. 알루미늄 두께의 변화에 따라 CA-t-Al-1, CA-t-Al-2 를, 접착제의 두께 변화에 따라 CA-t-ad-1, CA-t-ad-2 를, 스테인리스 스틸의 두께에 따라 CA-t-Fe-1, CA-t-Fe-2 를 사용하였다. 그리고 알루미늄 층의 개수에 따라 CA-n-Al-1, CA-n-Al-2 를 사용하였다. 각 모델에서

돔 높이를 비교한 것이 표 3 이다. 설계 변수 변화에 따라 돔 높이도 변하는데, 기본 모델에서 알루미늄의 두께를 줄인 모델의 돔 높이가 가장 큼을 알 수 있다. 그림 3 은 성형 해석 결과 중, 가운데 단면에서의 응력 분포를 나타내고 있다. 수직 응력 σ_{xx} 를 보면, 가운데 PZT 세라믹에서 압축력이 작용하고 있고 알루미늄 층에서는 강한 인장력이 작용함을 알 수 있다. 그리고 전단응력 중에 σ_{zx} 값이 가장 큰데, 위쪽 접착제 층과 아래쪽 접착제 층의 부호는 반대이고 크기는 비슷하게 계산되었다. 각 모델 간에 응력 분포를 비교해보면 수직응력보다는 전단응력 σ_{zx} 의 차가 두드러졌는데 이 값이 클수록 돔 높이 역시 증가함을 알 수 있었다.

Table 2. Material properties of each layer in CA-std

	PZT ceramic	Aluminum	Steel	Adhesive
Young's modulus, E (GPa)	$E_1=E_2=59, E_3=52$	72	190	3.8
Poisson's ratio, ν	0.34	0.33	0.3	0.4
Piezoelectric charge constants d (10^{-12} m/V)	$d_{31}=d_{32}=-260, d_{33}=540$	-	-	-
CTE, α ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	3	23	17	22

Table 3. Dome height(H) of curved actuators

Model	CA-std	CA-t-Al-1	CA-t-Al-2	CA-t-ad-1	CA-t-ad-2
H(mm)	6.665	4.388	2.783	7.179	6.199
Model	CA-t-Fe-1	CA-t-Fe-2	CA-n-Al-1	CA-n-Al-2	
H(mm)	6.486	4.976	3.896	2.009	

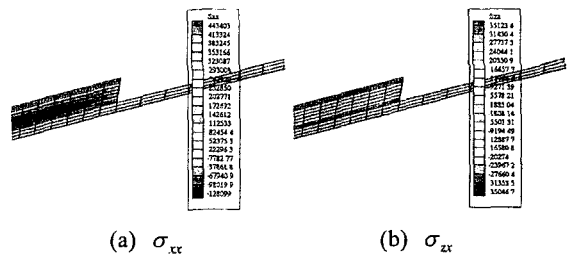


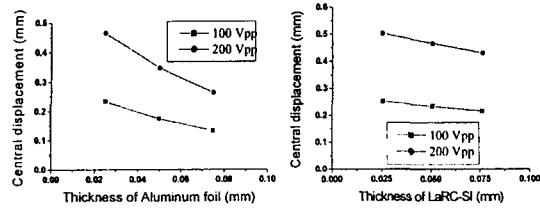
Fig.3 Stress distribution

설계 변수에 따른 작동 변위를 입력 전압 100Vpp 와 200Vpp 에 대해 그림 4 에 도시하였다. 알루미늄과 접착제의 두께가 얇을수록 작동변위가 커졌으며, 스테인리스 스틸은 큰 영향은 없었다. 그리고 알루미늄 층의 개수도 적은 것이 유리했다. 알루미늄이나 접착제의 두께가 얇을수록 유리했지만

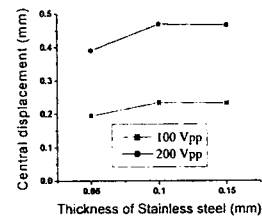
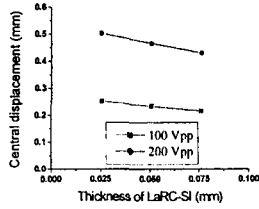
이 때의 응력 또한 증가하므로 강도 비교를 통한 안전성 검토가 차후 진행될 예정이다.

026)

참고문헌



(a) Thickness of Aluminum (b) Thickness of LaRC™-SI



(c) Thickness of Stainless steel (d) Number of Aluminum

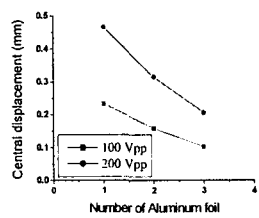


Fig.4 Actuating displacement w.r.t design factors

5. 결론

본 논문에서는, 수백만 자유도를 사용한 유한요소 모델을 사용하여 곡면형 작동기의 성형곡률 해석과 작동성능 해석을 수행하였다. 이를 위해 압전 재료를 고려한 선형 및 비선형 해석 프로그램을 개발하였고, 본 연구실에서 구축한 PEGASUS 시스템을 활용하였다. 실험치와의 비교를 통해 타당한 결과를 얻음을 확인하였다. 비선형 해석에서는 접착제 물성치의 온도에 따른 변화를 고려하여 실험치에 보다 가까운 결과를 얻었다. 설계 변수를 변화시켜가면서 뒀 높이와 작동 변위를 계산하였는데, 성형 후에 생기는 내부 응력 가운데 전단 응력 σ_x 가 클수록 뒀 높이가 커진다는 사실을 알았고 이 때 작동 변위도 커졌다. 이와 같은 결과를 바탕으로, 고성능 컴퓨팅을 활용하면 작동기 성능을 정밀하게 예측하여 설계에 활용할 수 있을 것으로 판단한다.

후 기

본 논문은 과학기술부의 국가지정연구실 사업에 의해 지원되었습니다.(과제번호 : 00-N-NL-01-C-

- (1) THUNDER WHITE PAPER, FACE International Corporation, (2001).
- (2) R.F. Hellbaum, R.G. Bryant and R.L. Fox, "Thin layer composite unimorph ferroelectric driver and sensor," US Patent Nos.5,632,841, (27 May 1997).
- (3) G.H. Haertling, "Rainbow ceramics – a new type of ultra-high-displacement actuator," Am. Ceram. Soc. Bulletin, 73, (1994), 93-96.
- (4) Guang Li and Gene H Haertling, "Stress-sensing characteristics of PLZT-based Rainbow ceramics," Smart Materials and Structures, 6, (1997), 425-431.
- (5) R.G. Bryant, "LaRC™-SI : a soluble aromatic polyimide," High Performance Polymers, 8, (1996), 607-615.
- (6) Karen S. Whitley, Thomas S. Gates, Jeffrey A. Hinkley and Lee M. Nicholson, "Mechanical properties of LaRC™-SI polymer for a range of molecular weights," NASA/TM-2000-210304.
- (7) K Joon Yoon, Seokjun Shin, Hoon C Park and Nam Seo Goo, "Design and manufacture of a lightweight piezo-composite curved actuator," Smart Materials and Structures, 11, (2002), 163-168.
- (8) Karla M. Mossi, Gregory V. Selby and Robert G. Bryant, "Thin-layer composite unimorph ferroelectric driver and sensor properties," Materials Letters, 35, (1998), 39-49.
- (9) Stephanie A. Wise, "Displacement properties of RAINBOW and THUNDER piezoelectric actuators," Sensors and Actuators A, 69, (1998), 33-38.
- (10) R.W. Schwartz and M. Narayanan, "Development of high performance stress-biased actuators through the incorporation of mechanical pre-loads," Sensors and Actuators A, 101, (2002), 322-331.
- (11) Ho-Jun Lee, Dimitris A. Saravanos, "A mixed multi-field finite element formulation for thermopiezoelectric composite shells," International Journal of Solids and Structures, 37, (2000), 4949-4967..
- (12) Taleghani, B.K. and J.F. Campbell, "Non-linear finite element modeling of THUNDER piezoelectric actuators," NASA/TM-1999-209322, (1999).